

Yapı Zemin Etkileşiminin Yığma Bir Minarenin Sismik Davranışına Etkisi

Elifnur ŞAKALAK^{1*}, Ali Ekber SEVER², Pınar USTA EVCİ³

^{1,2,3}Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32000, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 28.05.2024, Kabul / Accepted: 16.09.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 23.12.2024)

Anahtar Kelimeler

Deprem,
Minare,
Yapı zemin etkileşimi,
Yığma

Öz: Zemin ile üst yapının geometrik, mekanik ve dinamik özellikleri birbirlerine aktarıldığı için tasarımları bağımsız düşünülmemelidir. Yapı zemin etkileşimi göz önüne alınarak gerçekleştirilen analizlerde yapı periyodu ve periyoda bağlı olarak etki eden yatay kuvvetler zemin özelliklerine göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik bir yığma minare SAP2000 V23.1.0 programında modellenmiştir. Yapı zemin etkileşiminin minarenin sismik davranışına etkilerini görmek için minarenin, zemine ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. İki model üzerinde, 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine uygun modal analiz, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında analiz gerçekleştirilmiştir. Zaman tanım alanında analiz için son dönemde meydana gelen Türkiye'de asrın felaketi olarak adlandırılan Pazarcık Depremi, Elbistan Depremi ve Hatay Depremi'nin ivme kayıtları kullanılmıştır. Yapılan analizler sonucunda elde edilen veriler ile yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli modelin periyot değerinin daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda, yapının tepe noktasındaki en büyük yatay yer değiştirme değerleri karşılaştırıldığı zaman yapı zemin etkileşimli modelde daha büyük yer değiştirmelerin olduğu tespit edilmiştir. En büyük asal gerilmeler karşılaştırıldığında yapı zemin etkileşimli modelde ankastre mesnetli modele nazaran daha yüksek asal gerilmelerin olduğu tespit edilmiştir.

The Effect of Structure Soil Interaction on the Seismic Behavior of a Masonry Minaret

Keywords

Earthquake,
Masonry,
Minaret,
Structure soil interaction

Abstract: Since the geometric, mechanical and dynamic properties of the soil and the superstructure are transferred to each other, their designs should not be considered independent. In the analyzes carried out considering the structure-soil interaction, the structure period and the horizontal forces acting depending on the period vary according to the soil properties. In this study, the effect of the structure-soil interaction on the seismic behavior of a masonry minaret was investigated. For this purpose, a typical masonry minaret, which is thought to have been built in the Isparta province of Turkey, was modeled in the SAP2000 V23.1.0 program. In order to see the effects of structure soil interaction on the seismic behavior of the minaret, two separate finite element models of the minaret were created with fixed support (FS) and structure soil interactive (SSI). On two models, modal analysis, response spectrum analysis and time history analysis in accordance with the 2018 Turkish Structure Earthquake Regulation were performed. For the time history analysis, the acceleration records of the Pazarcık Earthquake, Elbistan Earthquake and Hatay Earthquake, which are called the disaster of the century in Turkey, which occurred recently, were used. The data obtained as a result of the analyzes were compared with the results of the models with structure soil interaction and fixed support. As a result of the modal analysis, it was determined that the period value of the SSI model

was higher. As a result of the analyzes made in the time history, it was found that there were larger displacements in the SSI model when the largest horizontal displacement values at the top of the structure were compared. When the largest principal stresses were compared, it was found that higher stresses occurred in the SSI model than in the FS model.

1. Giriş

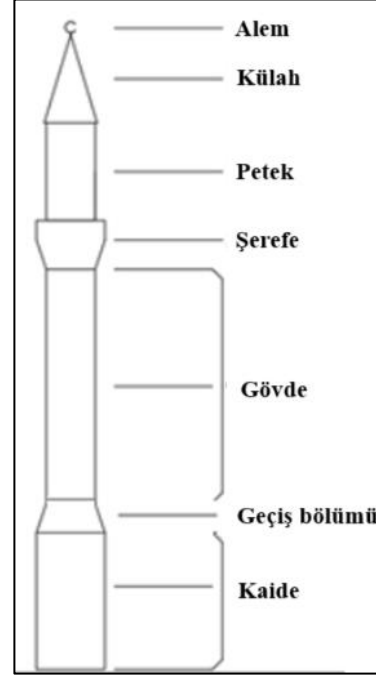
Depremler, Türkiye'de en önemli doğal tehditler arasında yer almaktadır. Türkiye, dünyanın sismik olarak en aktif bölgelerinden birinde yer aldığından, tarihi mirasın korunması sorununa büyük önem verilmesi oldukça anlaşılır bir durumdur. Yapı mühendisleri, özellikle bu yapıları oluşturan malzemelerin oldukça karmaşık davranışlarından dolayı, bu tür yapıların analizini ve tasarımını her zaman oldukça zor bulmuştur. Analize dinamik davranış dahil edildiğinde sorun daha da karmaşık hale gelir.

Kule tipi yığma yapılar yapısal formları gereği oldukça hassas ve narindirler. Bu özellikleri sebebiyle deprem ve rüzgâr gibi dinamik yüklere maruz kaldıklarında daha savunmasızdırlar. Birçok kule tipi yığma yapı, büyük depremler, şiddetli rüzgarlar veya herhangi bir belirti olmaksızın aniden tamamen veya kısmen yıkılmıştır. Örneğin İzmir'deki Selahattin Oğlu Minaresi ve Kilis'teki Şih Ahmet Minaresi depremlerde hasar gören yapılardan bazılarıdır (Şekil 1).



a) Şih Ahmet Minaresi [1] b) Selahattin Oğlu Minaresi [2]
Şekil 1. Depremde hasar gören minareler.

Kule tipi yapılardan olan yığma tarzda inşa edilmiş minareler Türkiye'de oldukça fazladır. Minareler genel olarak kaide, geçiş bölümü, gövde, şerefe, petek, külah ve alem olmak üzere 7 bölümden oluşur (Şekil 2). Yığma minarelerde gerilmeler genel olarak geçiş bölgesinde ve silindirik bölgede yoğunlaşır [3-7]. Dolayısıyla yığma minareler genellikle bu bölgelerden geçer. İnce ve yüksek yapılar olan tarihi yığma minareler, sıklıkla harç, taş veya tuğla kullanılarak inşa edilir.



Şekil 2. Minare bölümleri [8]

Tarihi yapıların deprem davranışları, yapılarında yerel malzeme ve yerel yapım yöntemleri kullanıldığı için birbirine benzememektedir. Literatürde yığma minarelerin deprem yükü altındaki dinamik analizleri ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça fazladır. Ancak yapılan çalışmaların çoğunda yapı zemin etkileşimi göz ardı edilerek yapı zemine ankastre olarak mesnetlendirilmiştir. Bu tarz yapılan çalışmalar aşağıda anlatılmıştır.

Işık vd. [9] çalışmalarında Türkiye'de Bitlis'te bulunan tarihi Ulu Cami minaresini incelemişlerdir. Gerçekleştirdikleri yapısal analizlerde farklı aşılma olasılıkları ile bölgede daha önce meydana gelmiş olan depremlerin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Analiz sonuçlarında aşılma olasılıkları arttıkça gerilmeler, taban kesme kuvvetleri ile yer değiştirme değerlerinin azaldığını görmüşlerdir. Maraş vd. [10] tarihi bir camiyi minaresi ile birlikte modelleyip analiz etmişlerdir. Zaman tanım alanında analiz ile yapının sismik davranışını elde etmişlerdir. Analizlerde bölgede meydana gelen bir depremin de ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Dinamik analiz sonrası modelde elde edilen olası çatlak bölgeleri ile deprem sonrası yapıda oluşan hasar bölgelerinin benzerlik gösterdiği sonucuna varmışlardır. Trešnjo vd. [11] tarihi bir minarenin yapısal davranışını değerlendirmek için analizler yapmışlardır. Yapı yerinde incelemeler yapılarak ilk doğal frekansı elde etmişler ve modal analizden elde ettikleri ile kıyaslayıp uyumlu olduğu sonucuna varmışlardır.

Türker vd. [12] iki eğik yığma minare için uzak ve yakın fay hareketi kayıtlarının bu minarelerdeki sismik davranışa etkilerini incelemişlerdir. Işık vd. [13] minarelerde kullanılan malzemelerin karakteristik özelliklerinin yapının dinamik davranışı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. 9 farklı minare modeli üzerinde 13 farklı malzeme türünü değişken olarak kullanmışlardır. Malzeme özelliklerinin, minarelerin dinamik davranışına önemli derecede etki ettiği sonucuna ulaşmışlardır. Şentürk vd. [14] çalışmalarında tarihi bir camiyi ve minaresini modellemişlerdir. Yapının dinamik analizi için önceden meydana gelmiş depremlerin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Yapılan analiz sonucunda yapıda güçlendirme yapılması gerektiğini vurgulamışlardır. 5 farklı teknikle güçlendirilmiş modelde tekrar analiz gerçekleştirilmiştir. Güçlendirme tekniklerinin yapının sismik davranışını artırıcı etkisi olduğu sonucuna varmışlardır. Yapılan güçlendirme tekniklerinden 2 tanesinin kritik yerde oluşabilecek hasar riskini ortadan kaldırdığını görmüşlerdir. Işık vd. [15] çalışmalarında Türkiye’de bulunan Bitlis’teki Beş Minarenin yapısal analizini gerçekleştirmişlerdir. Tahribatsız yöntemlerle malzeme özelliklerini elde etmiş ve makro modelleme yöntemi ile minareleri modelleyip analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda minarelerin geçiş bölgelerinde gerilmelerin maksimum olduğunu tespit etmişlerdir.

Genç vd. [16] tarihi bir cami ve minaresini deneysel yöntemlerle ve bilgisayar programında modelleyerek incelemişlerdir. Deneysel veriler yardımı ile sonlu eleman modellerini güncellemişlerdir. Sonuçta hem cami hem de minare modellerinde en etkili güncelleştirilmiş parametrenin elastisite modülü olduğunu bulmuşlardır. Alemi vd. [17] Keşan’da bulunan tarihi bir minareyi araştırmışlardır. Sonlu elemanlar programı kullanarak minarenin sismik analizini gerçekleştirmişlerdir. Minarenin yapısal formunu ve inşasındaki mimari düzenlemeleri yapının depremlere karşı ciddi bir hasar almama nedeni olarak yorumlamışlardır. Yurdakul vd. [3] çalışmalarında tarihi yığma bir minarenin deprem davranışını araştırmışlardır. Analiz için önceden meydana gelmiş 3 adet depremin ivme kayıtlarını kullanmışlardır. Analizler sonucunda deprem yükleri nedeniyle oluşan çekme gerilmelerinin sınır gerilmelerini aştığını belirtmişlerdir.

Hökelekli vd. [4] çalışmalarında tarihi bir yığma minarenin sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Model üzerinde önceden meydana gelmiş deprem ivme kayıtlarını kullanarak doğrusal ve doğrusal olmayan sismik analizleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında doğrusal olmayan analizden elde edilen gerilme değerlerinin daha gerçekçi olduğu sonucuna varmışlardır. Adam vd. [18] çalışmalarında tarihi yığma bir minareyi sonlu elemanlar modeli ile modellemişlerdir. Yapının kendi ağırlığı altında statik analizi ile rüzgâr ve deprem

yükleri altında dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Analizleri doğrusal ve doğrusal olmayan analizler olarak uygulamışlardır. Statik ve dinamik analizler ile doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerin sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hoseynzadeh ve Mortezaei [19] çalışmalarında tarihi bir minareyi sonlu elemanlar programında modelleyip itme analizini, doğrusal olmayan zaman tanım alanında analizini ve modal analizini gerçekleştirmişlerdir. Sismik analizler sonucu 3 farklı güçlendirme yöntemi (FRP sheets, Ferro-cement and fiber reinforced cementitious matrix (FRCM)) uygulamışlardır. Güçlendirme yöntemlerini kıyasladıklarında en etkili yöntemin Ferro-cement olduğu sonucuna varmışlardır.

Kılıç vd. [20] çalışmalarında Hızırbey Cami minaresinin lineer dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında 2007 ve 2018 Türkiye deprem yönetmeliklerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca minare yapısını hem çubuk elemanlarla hem de kabuk elemanlarla modelleyerek sonuçları karşılaştırmışlardır.

Yukarıda verilen çalışmalarda ankastre mesnet tanımlaması yapıldığı için yapının sert bir zemin üzerine inşa edildiği düşünülmüştür. Eğer yapının oturacağı zemin elastik özellikte sert bir kaya ise bu yaklaşımın doğru olduğu kabul edilebilir [21]. Ancak zemin tam olarak rijit bir malzeme olmadığı gibi her bölgede zemin cinsi kaya olarak kabul edilemez. Yumuşak zeminlerde bu kabul yapıp ankastre mesnet tanımlamasına göre analiz yapıldığında gerçeği yansıtan sonuçlar elde edilemeyebilir. Dolayısıyla yapı ile zemin beraber analiz edilerek yapı zemin etkileşimi dikkate alınmalıdır.

Üst yapı taşıyıcı sisteminde yapı yüklerinin zemine aktarılması gerekir. Ancak deprem anında zeminde bir yer hareketi meydana geldiği için zemin bu hareketi üst yapıya ileterek yapıda deprem yükleri oluşturur. Üst yapıda oluşan deprem kuvvetleri (atalet kuvvetleri) tekrar zemine aktarılır [22]. Deprem meydana geldiği sırada zeminin yapıyı etkilemesi ile yapı hareketini ve yapı tepkisinin de zemin hareketini etkilediği bu olay yapı-zemin etkileşimi olarak adlandırılır. Analizlerde yapı zemin etkileşimli tam model göz ardı edilmemelidir. Literatürde yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak yapılan çalışmalar aşağıda sunulmuştur.

Korkmaz ve Demir [23] çalışmalarında doğrusal olmayan analizler yaparak yapının davranışının zemin türünden ve özelliklerinden nasıl etkilendiğini incelemişlerdir. 4 farklı rijitliğe sahip zemini ele alarak yapıyı hem ankastre hem de yaylarla modellemişlerdir. Zemin şartlarının iyi olmadığı durumlarda periyodun değiştiğini görmüşlerdir. Girgin vd. [24] yapısal tasarımı yapı zemin etkileşiminin tasarıma etkisini ortaya koymayı amaçlamışlardır. Bunun için değişken yatak katsayısı, sabit yatak katsayısı ve rijit yapı zemin yöntemlerini

kullanarak bir yapı modelleyip analizini gerçekleştirmişlerdir. Rijit yapı zemin modeline göre diğer modellerde periyotlarda artış olduğunu gözlemlemişlerdir.

Baş [25] çalışmasında betonarme bir yapıyı sonlu elemanlar modeli ile modelleyip yapı zemin etkileşimi ile rijit temel modellerini karşılaştırmıştır. Deprem yüklemelerini hem yatay hem de yatay+düsey şeklinde yüklemiştir. Yapılan yüklemeler sonucu taban kesme kuvvetlerinde değişiklik olmadığını görmüştür. Yapı zemin etkileşimli model ile rijit temel modeli karşılaştırdığında yapı zemin etkileşimi modelden elde edilen sonuçların daha yüksek olduğunu görmüştür. Lazizi ve Tahghighi [26] çalışmalarında tarihi bir yapının deprem hasarı ile yıkılma mekanizmasını incelemek amacıyla yapının sonlu eleman modelini oluşturmuşlardır. Modelleme yapılırken, üst yapıyı hem temele mesnet ile bağlayıp hem de yapı zemin etkileşimi ile gerçekleştirmişlerdir. Model üzerinde doğrusal olmayan statik ve dinamik analizler (zaman tanım alanında analiz) uygulamışlardır. Yapı zemin etkileşimi dikkate alınarak yapılan model analizinden elde edilen periyot değerlerini ankastre mesnetli modelden elde edilen değerlerden daha büyük bulmuşlardır. Zaman tanım alanında gerçekleştirilen dinamik analiz sonuçlarında yapı zemin etkileşimi modelinde daha büyük yer değiştirme değerleri elde etmişlerdir.

Hökeleki ve Al-Helwani [27] tarihi yığma bir minareyi ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli olarak modellemişlerdir. Bu modeller üzerinde zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları analizlerde yapı zemin etkileşiminin yapısal davranış üzerinde önemli bir etkisi olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Fathi vd. [28] çalışmalarında İran'da bulunan tarihi bir yapının ankastre mesnetli modelini ve yapı zemin etkileşimini dikkate alarak tam modelini oluşturmuşlardır. Modeller üzerinde statik analiz, modal analiz ve zaman tanım alanında doğrusal olmayan analiz gerçekleştirmişlerdir. Ankastre mesnetli modelde yapının deprem yüklemelerine karşı tatmin edici davranış sergilediğini görmüşlerdir. Yapı zemin etkileşimini ele alan modelde ise yapı, deprem kaydının y bileşeninde yetersiz kalmıştır. Karki vd. [29] çalışmalarında bir yapıyı sabit ve esnek tabanlı olarak modellemişlerdir. Model üzerinde doğrusal statik analiz ile doğrusal olmayan statik analiz gerçekleştirmişlerdir. Sabit temelde daha yüksek yük taşıma kapasitesi elde etmişlerdir.

Yıldız ve Doğan [30] çalışmalarında baraj yapımı nedeniyle başka bir bölgede tekrar yapılan tarihi bir yapının yapı zemin etkileşimini dikkate alarak sismik analizini gerçekleştirmişlerdir. Yapının analizi için SAP2000 programını kullanmışlardır. Dinamik analiz için Sivrice ve Kocaeli deprem kayıtlarını kullanmışlardır. Analizlerden yanal yer değiştirme,

davranış spektrumu ve iletilen ivme sonuçlarını elde etmişlerdir.

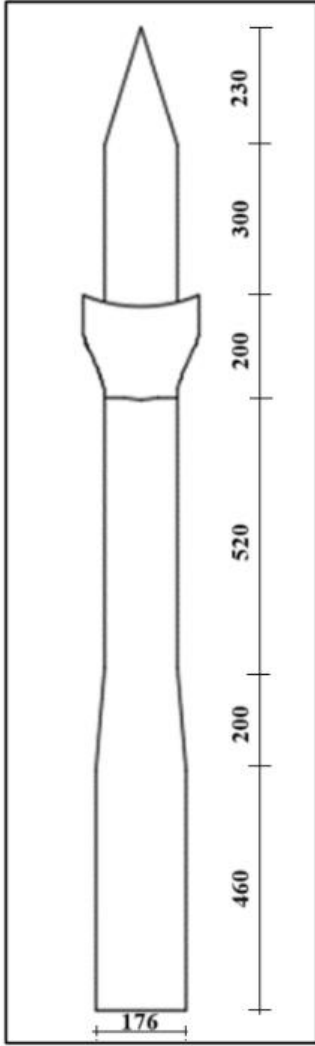
Caccliola vd. [31], İtalya'da bulunan yığma bir çan kulesinin doğrusal olmayan sismik performansını yapı zemin etkileşimini dikkate alarak incelemişlerdir. Çalışmanın sonunda yapı zemin etkileşiminin, çan kulesinin sismik performansında kritik bir rol oynadığını ve deprem sırasındaki gerilme ile yer değiştirmeler üzerinde önemli etkilerinin olduğu tespit etmişlerdir. Shabani ve Kioumarsi [32], yığma bir kulenin dinamik davranışını yapı zemin etkileşimini dikkate alarak araştırmışlardır. Bu amaçla öncelikle operasyonel modal analiz yöntemiyle kulenin mod şekilleri ve periyot değerlerini elde etmişlerdir. Elde ettikleri bu bilgileri kullanarak bir bilgisayar programında kulenin sonlu elemanlar modelini oluşturmuşlardır. Yaptıkları analizler sonucunda yapı zemin etkileşiminin, kulenin sismik performansı üzerinde önemli bir role sahip olduğunu söylemişlerdir.

Literatürde, yığma yapılar genellikle sadece üst yapı dinamikleri dikkate alınarak analiz edilmektedir. Zemin özelliklerinin yapının dinamik davranışına etkisi yeterince araştırılmamıştır. Bu eksiklik, yığma yapıların deprem karşısındaki performansının daha güvenilir bir şekilde değerlendirilmesini olumsuz etkilemektedir. Özellikle, minare gibi yüksek ve ince yığma yapıların zemin ile olan etkileşimlerinin, sismik performansları açısından kritik öneme sahip olduğu düşünülmektedir. Bu çalışma yapı zemin etkileşiminin; deprem etkileri altındaki yığma bir minarenin periyot, yer değiştirme ve gerilmelerine olan etkilerini inceleyerek literatüre katkı sağlamakta ve yığma minarelerin daha güvenli tasarımı için önemli bir temel oluşturmaktadır.

Bu çalışmada Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik bir yığma binanın SAP2000 V23.1.0 [33] programında zemine ankastre mesnetli ve yapı zemin etkileşimli iki ayrı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Türkiye'de asrın felaketi olarak adlandırılan, ülkeyi derinden sarsan Pazarcık, Elbistan ile Hatay depremlerinin ivme kayıtları kullanılarak modeller üzerinde modal analiz, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında analiz yapılmıştır.

2. Minare Hakkında Bilgi ve Minarenin Modellenmesi

Tipik bir yığma minarenin SAP2000 V23.1.0 programında zemine ankastre mesnetli modeli ile yapı zemin etkileşimi dikkatle alınarak tam modeli oluşturulmuştur. Minarenin kaide (kürsü) bölümü kare planlı taş malzeme olup 80 cm kalınlığında olduğu düşünülmüştür. Gövde bölümü çokgen ve geçiş bölgesi (pabuç) prizmatik kesitli taş malzeme olup 20 cm kalınlığında olduğu düşünülmüştür. Yerden yüksekliği 19.10 m olan minarenin geometrik görünümü Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Minarenin geometrik görünümü (cm)

Yığma türündeki minarede taş malzeme kullanıldığı düşünülmüştür. Malzeme özellikleri, literatürde yığma minarelerle ilgili yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinden alınmıştır [34]. Tablo 1’de minareyi oluşturan malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Malzeme özellikleri [34]

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	Poisson Oranı
Taş	5000	24	0.2

Yapı zemin etkileşimi modeli için gevşek, orta ve sert kum olmak üzere üç katmandan oluşan zemin modellemesi yapılmıştır. Zemin malzeme özellikleri, literatürde yapılan çalışmalarda kullanılan malzeme özelliklerinden alınmıştır [35]. Tablo 2’de zemin malzemelerinin özellikleri verilmiştir.

Tablo 2. Zemin özellikleri [35]

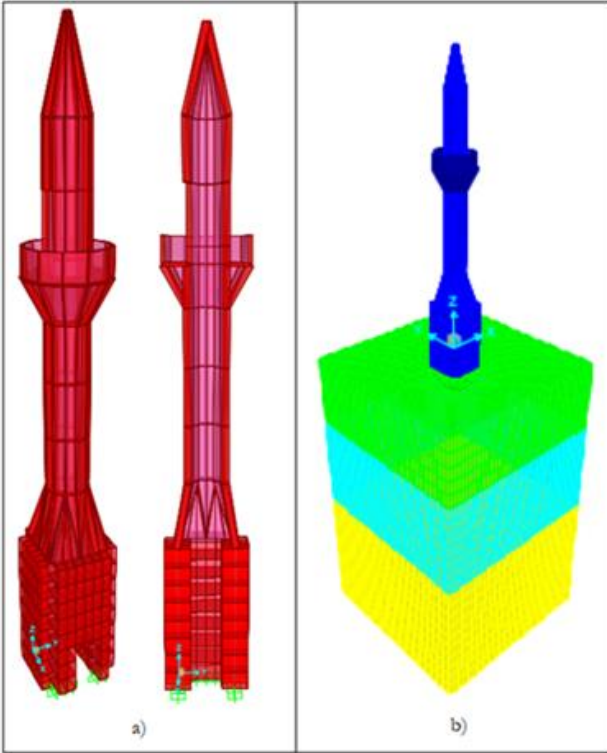
Zemin

	Gevşek	Orta Sıkı	Sıkı
Birim Hacim Ağırlık (kN/m ³)	14.6	15.8	17
Elastisite Modülü (kN/m ²)	15600	30160	40300
Kayma Modülü (kN/m ²)	6000	11600	15500
Poisson Oranı	0.3	0.3	0.3
İçsel Sürtünme Açısı (°)	28	38	42

Yapının, SAP2000 V23.1.0 programında hem zemine ankastre olarak mesnetlenmesi hem de yapı zemin etkileşimi göz önünde bulundurularak üst yapı ile zeminin birlikte modellenmesi olmak üzere iki ayrı modeli oluşturulmuştur. Şekil 4a’da verilen ankastre mesnetli modelde yapı shell eleman olarak modellenmiştir. Yapı modelinde 347 adet shell eleman kullanılmıştır.

Yapı zemin etkileşimli modelde sonlu bir bölge oluşturacak şekilde modellenen sonsuz boyuttaki zemin içerisinde yayılan sismik dalgalar sonlu bölgenin sınırlarına çarpar ve zemin içerisinde hareket halinde olurlar [36]. Çalışmada sonsuz boyuttaki zemin sonlu bir bölge oluşturacak şekilde modellenmiştir. Zemin gevşek, orta sıkı ve sıkı olmak üzere 3 tabakadan oluşmaktadır. Zeminin sınır koşullarında, yan yüzeylerinde x ve y yönünde hareket edemeyen ancak z yönünde hareket edebilen, tabanında ise üç yönde de (x, y, z) hareket edemeyen mesnetleme yapılmıştır. Zemin tabakaları programda solid eleman olarak modellenmiştir. Yapı zemin etkileşimli model Şekil 4b’de verilmiştir. Yapı modelinde zemini oluşturan 12672 adet solid eleman kullanılmıştır.

Mesh adeti belirlenirken analiz süresini kısaltmak ve sonuçların doğruluğunu korumak amacıyla optimum sayıda mesh kullanılmıştır. Bunun için bir yakınsama çalışması yapılmış ve sonuçların önemli ölçüde değişmediği mesh adedinde karar kılınmıştır.



Şekil 4. a) Ankastre mesnetli model b) Yapı zemin etkileşimli model.

2.1. Deprem parametrelerinin belirlenmesi

Minarenin inşa edildiği düşünülen bölgenin deprem parametreleri Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'de (TBDY 2018) [37], tanımlanan DD-2 deprem yer hareketi düzeyi için <https://tdth.afad.gov.tr> adresinden alınmıştır [38]. Tablo 3'te ilgili parametreler verilmiştir.

Tablo 3. Deprem parametreleri [38]

Parametre	Değer
Kısa periyot harita spektral ivme katsayısı (S_s)	0.738
1.0 saniye periyot için harita spektral ivme katsayısı (S_1)	0.170
Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı (S_{DS})	0.889
1.0 saniye periyot için tasarım spektral ivme katsayısı (S_{D1})	0.255

Zaman tanım alanında analizlerin gerçekleştirilmesi için gerçek deprem ivme kayıtları kullanılmıştır. Asrın felaketi olarak adlandırılan Türkiye'de meydana gelen 3 depremin ivme kayıtları kullanılmıştır. 6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda merkez üssü Kahramanmaraş Pazarcık olan 8.6 km derinlikte saat 04:17'de 7.7 büyüklüğünde birinci deprem ve merkez üssü Kahramanmaraş Elbistan olan 7 km derinlikte saat 13:24'te 7.6 büyüklüğünde ikinci deprem meydana gelmiştir. 20 Şubat 2023 tarihinde ise merkez üssü Hatay Defne'de 16.7 km derinlikte saat 20:04'te 6.4 büyüklüğünde bir deprem daha meydana gelmiştir. Depremler 11 ilde büyük yıkıma neden olmuştur. 51000'e yaklaşan can kaybı ve 107000' i

aşan yaralı sayısı ile deprem "asrın felaketi" olarak adlandırılmıştır. Literatürde depremlerin tarihi yapılar üzerindeki etkilerini inceleyen birçok araştırma yer almıştır.

Erkek ve Yetkin [39], 6 Şubat 2023 depremlerinde ağır hasar gören tarihi Envar ül Hamit Camii'nin sismik performansını incelemişlerdir. Yapının sismik analizini incelemek için 6 Şubat 2023'te meydana gelen ilk depremin her iki yatay bileşenini yapıya uygulamışlardır. Analizlerden en büyük yer değiştirme, taban kesme kuvveti, asal gerilmeler ve plastik deformasyon parametrelerini elde ederek değerlendirmişlerdir. Analiz sonuçlarını tarihi yapının uğradığı gerçek hasarla karşılaştırmışlardır. En büyük asal gerilmelerin tarihi minarenin geçiş bölgesinde elde edildiğini bulmuşlardır. Uyguladıkları doğrusal olmayan analizde tarihi minarenin üst geçiş bölümünden çöktüğünü görmüşlerdir.

Nasery [40], çalışmasında, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş'ta meydana gelen depremler sonrasında büyük hasar gören Harran Ulu Camii (Ulu Cami) minaresinin deprem sonrası durumunu incelemiştir. Ersoy [41], yaptığı çalışmada, iki yıkıcı deprem olan Kahramanmaraş depremlerinin Antakya Kurtuluş Caddesi civarında bulunan tarihi yapılar üzerindeki etkilerini araştırmak amacıyla bir saha çalışması yapmıştır. Çalışması sonucunda en sık görülen hasar türlerinden birinin duvarların düzlem dışı hareketi olduğunu görmüştür.

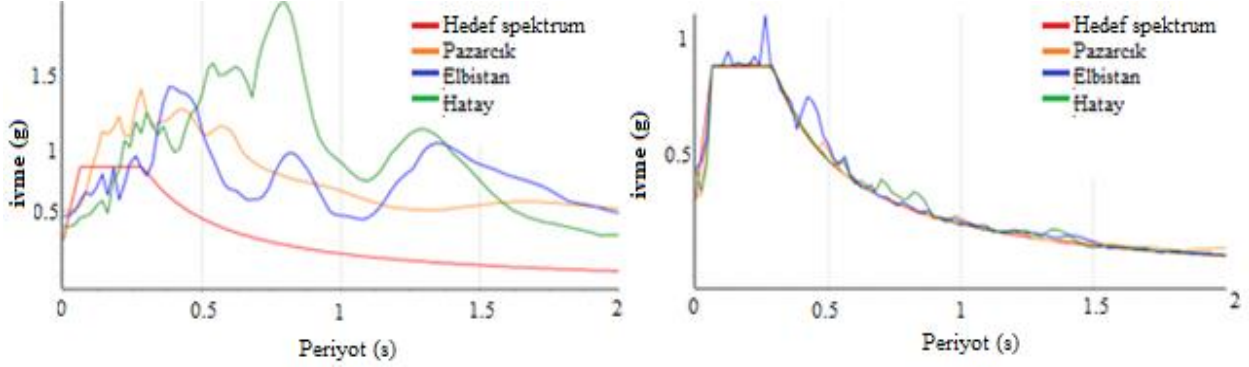
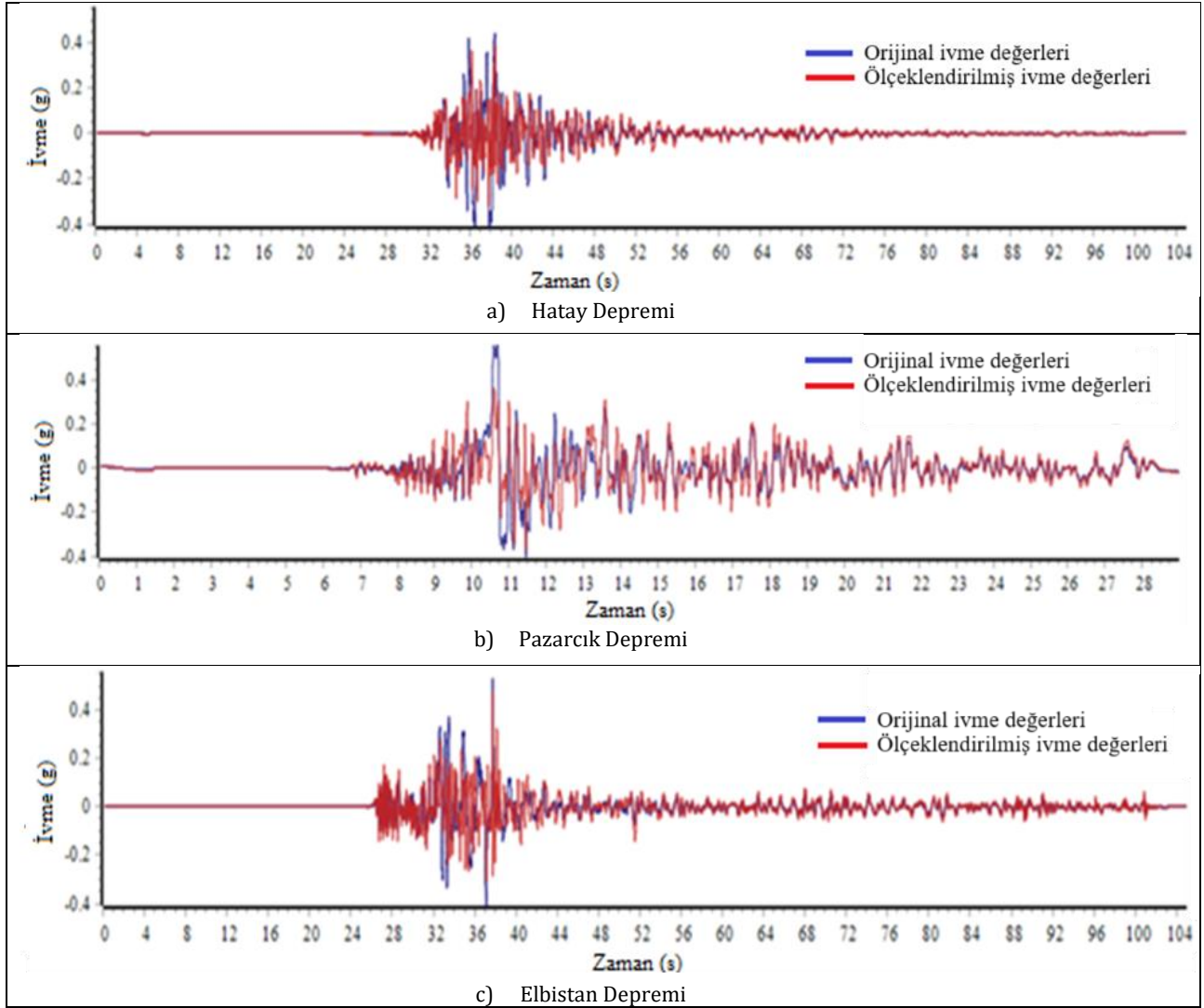
Onat vd. [42], 6 Şubat 2023 depremlerinden etkilenen tarihi Yusuf Paşa Camii'nin sismik davranışını incelemişlerdir. Yapı modeli üzerinde doğrusal olmayan zaman tanım alanı analizi gerçekleştirilerek yapıda bulunan çatlakların analiz sonuçlarıyla uyduğunu görmüşlerdir. Nasery [43], çalışmasında 6 Şubat 2023 depreminde hasar gören Harran Ulu Camii giriş kapısındaki yapısal hasarın nedenlerini araştırmıştır. Yapının sonlu eleman modelini oluşturarak statik ve doğrusal olmayan dinamik analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda depremin giriş kemerlerine düzlem dışından çarparak çökmeye neden olduğu yorumunu yapmıştır. Demir vd. [44], çalışmalarının bir bölümünde Kahramanmaraş depreminde hasar gören yığma yapıları incelemişler; harç kalitesinin düşük olması, yapı elemanı zayıflıkları, zayıf çekme bağlantıları, zayıf zemin diyaframları ve uyumsuzluk nedeniyle hasarların kesme kırıkları, düzlem dışı hareketler ve devrilme şeklinde meydana geldiğini gözlemlemişlerdir.

Depremlerin ivme kayıtlarına Türkiye İvme Veri Tabanı ve Analiz Sisteminden (TADAS) ulaşılmıştır [45]. Analiz için kullanılan depremler hakkında bilgi Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deprem bilgileri

Deprem	İstasyon	Büyükklük
6 Şubat 2023 Pazarcık	Pazarcık	7.7 (Mw)
6 Şubat 2023 Elbistan	Nurhak	7.6 (Mw)
20 Şubat 2023 Hatay	Yayladağı	6.4 (Mw)

Seismomatch [46] programı ile depremlerin ivme zaman grafiği minarenin bulunduğu bölgenin depremselliğine göre ölçeklendirilmiştir. Yatay elastik tasarım spektrumlarının orijinal halleri ile ölçeklendirilmiş durumları Şekil 5'te verilmiştir. Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme zaman grafikleri Şekil 6'da verilmiştir. Tüm deprem yüklemeleri için Doğu-Batı bileşeni alınmıştır.

**Şekil 5.** Orijinal ve ölçeklendirilmiş yatay elastik tasarım spektrumu [46]**Şekil 6.** Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme zaman grafikleri [46]

Tablo 5'te Pazarcık, Elbistan ve Hatay depremlerinin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme değerleri verilmiştir.

Tablo 5. Depremlerin orijinal ve ölçeklendirilmiş ivme değerleri [46]

	Pazarcık	Elbistan	Hatay
Orijinal ivme değerleri (g)	0.5672	0.5307	0.1708
Ölçeklendirilmiş ivme değerleri (g)	0.3699	0.4806	0.3748

Tablo 5 incelendiğinde ivme kayıtları üzerinde ölçeklendirme işlemi yapıldıktan sonra Pazarcık ve Elbistan depremlerinin PGA değerlerinde azalma, Hatay depreminin PGA değerinde ise önemli bir artış olduğu görülmektedir. Örneğin Pazarcık ve Elbistan depreminin Doğu-Batı bileşeninin PGA değeri ölçeklendirme işlemi yapıldıktan sonra sırasıyla %34.8 ve %9.44 oranında azalmıştır. Hatay depreminin PGA değeri ise %119.44 oranında artmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen yığma bir minarenin SAP2000 V23.1.0 programında TBDY 2018 tasarım depremi dikkate alınmış ve minare yapısının modal analizi, tepki spektrumu analizi ve zaman tanım alanında doğrusal dinamik analizleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yapı zemin etkileşimli tam model ve ankastre mesnetli model durumları için karşılaştırılmıştır. Yapı x ve y yönünde simetrik modellendiği için deprem yüklemeleri x yönü için yapılmıştır.

3.1. Modal analiz

SAP2000 V23.1.0 programında oluşturulan yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller üzerinde yapılan modal analiz sonucunda kütle ve rijitlik matrisleri ile minarenin periyotları ve mod şekilleri elde edilmiştir. Modların süperpozisyonunu gerçekleştirmek için Karelerin Toplamının Karekökü (SRSS) yöntemi kullanılmıştır. Tablo 6'da etkin

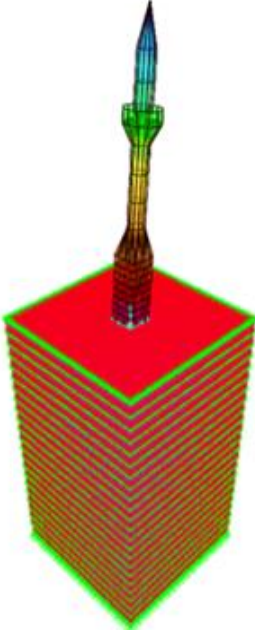
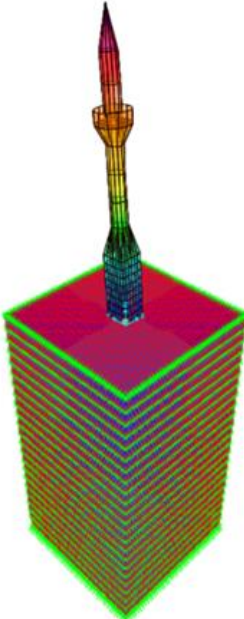
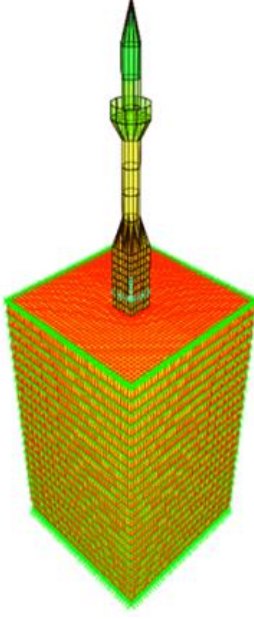
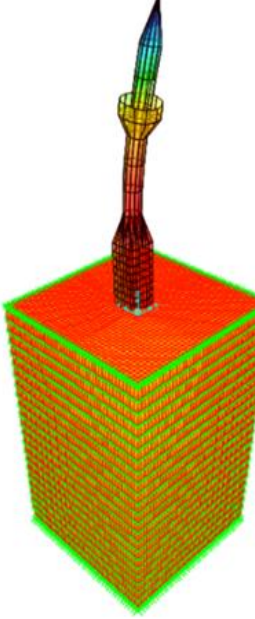

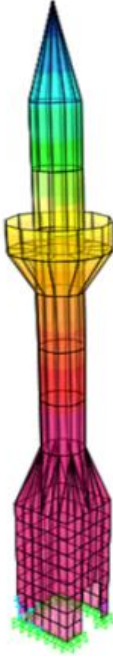
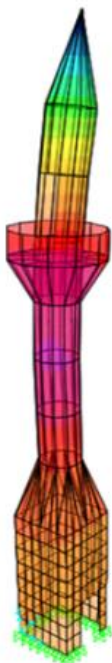
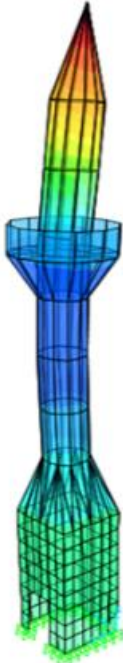
kütelerin toplamının bina toplam kütesine oranı verilmiştir. TBDY 2018'e göre, etkin kütlelerin toplamı, binanın toplam kütesinin %95'inden az olmamalıdır. Elde edilen 40 adet mod incelendiğinde 40. modda yapı zemin etkileşimli modelde etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütesine oranı her iki yön için (x ve y) yaklaşık %52 gelmiştir. Ankastre mesnetli modelde ise bu değer 40. modda her iki yön için de yaklaşık %93 bulunmuştur. TBDY 2018 için yapı zemin etkileşimli model 40. Modda yetersiz kalırken ankastre mesnetli model %95 değerine çok yaklaşmıştır.

Tablo 6. Etkin kütlelerin toplamının bina toplam kütesine oranı

Yapı Zemin Etkileşimli Model			Ankastre Mesnetli Model		
Mod	Top.UX	Top.UY	Mod	Top.UX	Top.UY
40	0.524	0.523	40	0.931	0.929

Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli modelin 1. modunun periyodu 2.18 s iken ankastre mesnetli modelde periyot 0.54 s olarak elde edilmiştir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelde periyot değerinin yaklaşık %75.3 azaldığı görülmüştür. Ankastre mesnetli modelde minare, zemine ankastre mesnetlendiği için zeminin tam rijit olduğu düşünülmüştür. Rijitlik ile periyot arasında ters orantı olduğu bilinmektedir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelde rijitlik arttığı için periyot değeri azalmıştır. Daha önceki çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır [26] – [28]. Tablo 6'da her iki modelin de ilk 4 periyodu (s) ve mod şekilleri verilmiştir. Tablo 7'de görüldüğü üzere modellerin modal analiz sonucunda elde edilen mod şekilleri karşılaştırıldığında ilk 2 mod şeklinin benzer olduğu görülmektedir. 3. ve 4. modlar karşılaştırıldığında farklı yönlerdeki eğilme modlarının hâkim olduğu görülmektedir. Ankastre modelde burulma modu 5. modda ortaya çıkarken yapı zemin etkileşimli modelde 7. modda burulma modu ortaya çıkmıştır.

Tablo 7. Yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modelin ilk 4 modunun periyot değerleri ile mod şekilleri

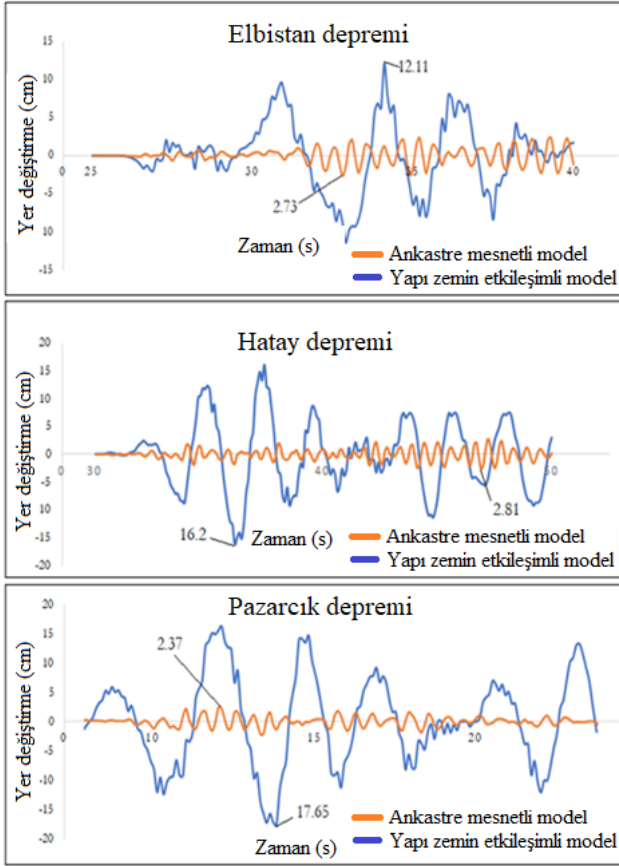
			
1. Mod T: 2.18 s	2. Mod T: 2.16 s	3. Mod T: 0.51 s	4. Mod T: 0.32 s
a) Yapı zemin etkileşimli model			
			
1. Mod T: 0.54 s	2. Mod T: 0.53 s	3. Mod T: 0.12 s	4. Mod T: 0.11 s
b) Ankastre mesnetli model			

3.2. Sismik analiz

3.2.1. En büyük rölatif yer değiştirme sonuçları

Modeller üzerinde yapılan zaman tanım alanında doğrusal analizler incelendiğinde en büyük rölatif yer değiştirme değerinin her iki model için de minarenin tepe noktasında ve x yönünde oluştuğu görülmüştür. Sismik yükler sonucu yapının tepe

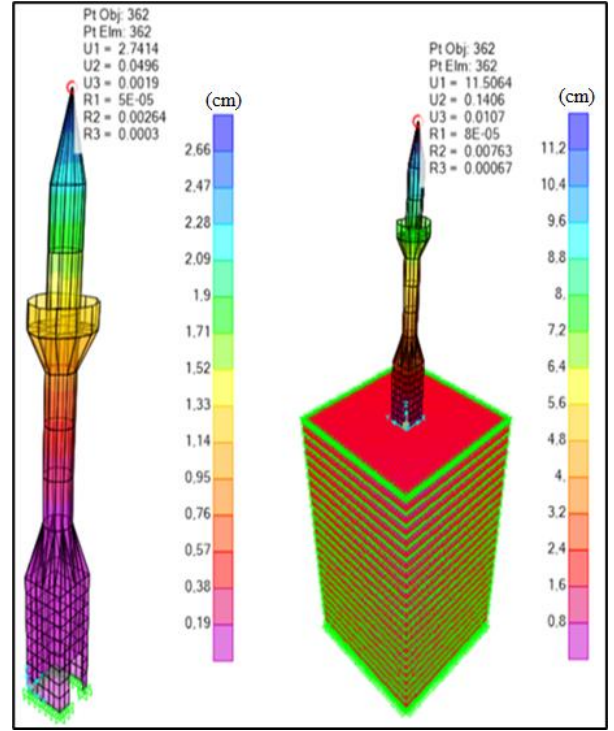
noktasında oluşun maksimum yer değiştirme değerleri her iki model için de Şekil 7'de yer değiştirme zaman grafiği olarak verilmiştir. Ankastre mesnetli modelden elde edilen yer değiştirme değerleri yapı zemin etkileşimli modelden elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında Elbistan, Hatay ve Pazarcık depremleri için sırasıyla %77.46, %82.65 ve %86.57 oranında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 7. Minarenin tepe noktasında elde edilen yer değiştirme-zaman grafiği

Şekil 7 incelendiğinde her üç deprem yüklemesi için de yapı zemin etkileşimli modelde, ankastr mesnetli modele nazaran çok daha yüksek yer değiştirme değerleri elde edilmiştir. Bunun sebebi ankastr mesnetli minare modelinin, yapı zemin etkileşimini göz önünde bulunduran modele göre eğilme rijitliğinin çok daha yüksek olmasıdır. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir [36].

Zaman tanım alanında yapılan analizlere benzer sonuçlar tepki spektrumu analizinden de elde edilmiştir. Yapı zemin etkileşimli ve ankastr mesnetli modeller için tepki spektrumu analizinden elde edilen minarenin tepe noktasındaki maksimum yer değiştirme sonuçları Şekil 8'de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde yapı zemin etkileşimli modelde 11.51 cm, ankastr mesnetli modelde 2.74 cm maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir. Yapı zemin etkileşimli modele göre ankastr mesnetli modelde yaklaşık %76 oranında azalma meydana gelmiştir.

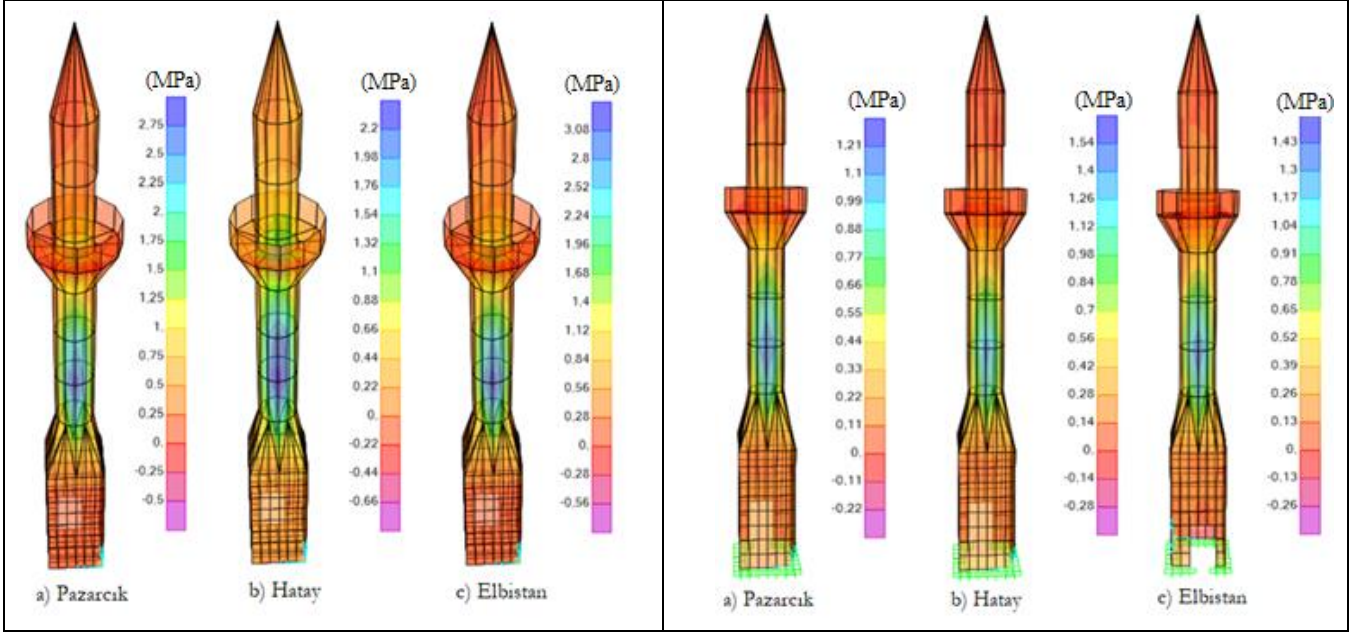


Şekil 8. Sırasıyla ankastr mesnetli ve yapı zemin etkileşimli modellerde minarenin tepesindeki maksimum yer değiştirme değerleri (tepki spektrum analizi)

3.2.2. Gerilme sonuçları

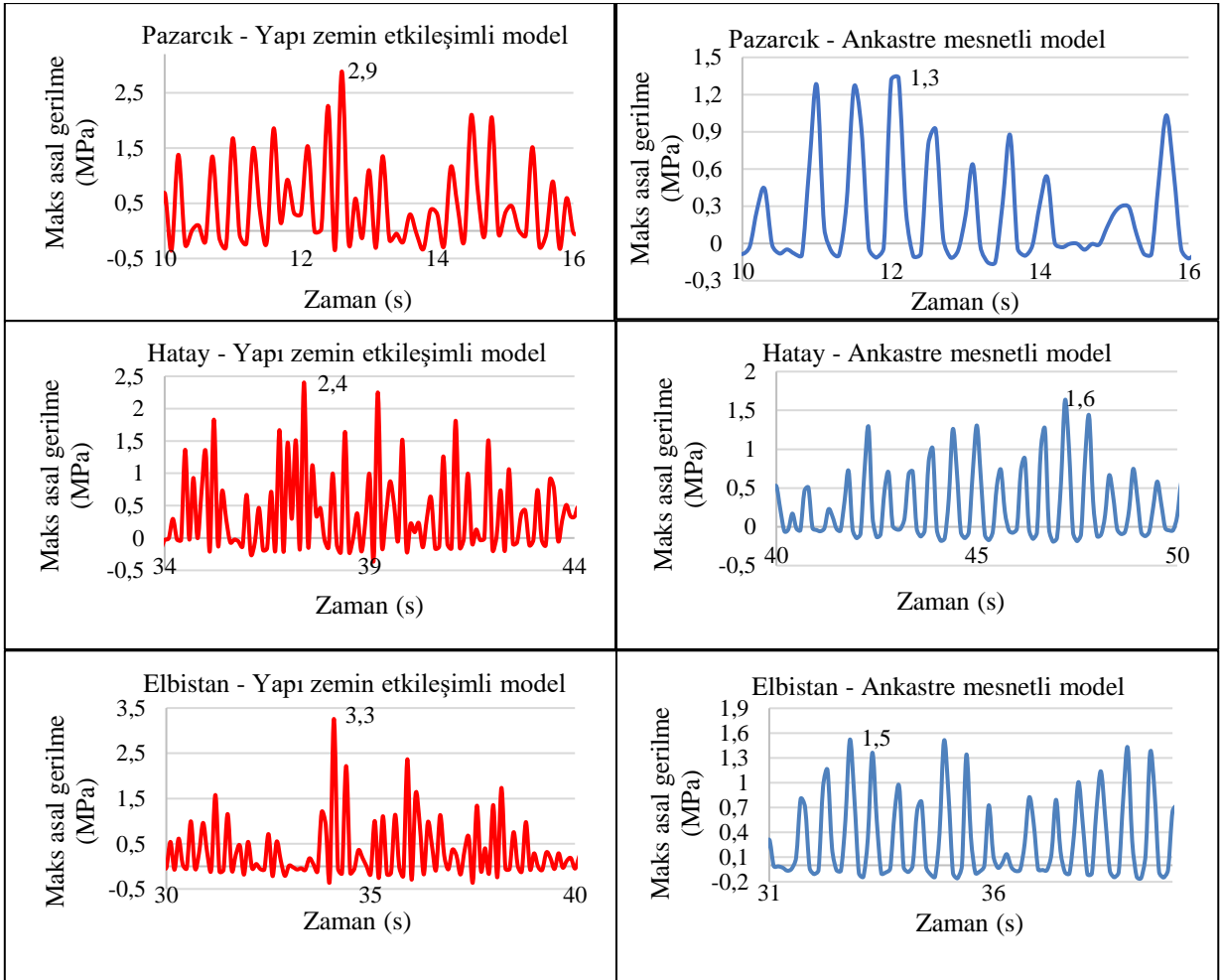
Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda her üç deprem için yapı zemin etkileşimli ve ankastr mesnetli modellerin maksimum asal gerilme diyagramı Şekil 9'da gösterilmiştir. Bu şekil incelendiğinde tüm depremler için yapı zemin etkileşimli modelde daha yüksek asal gerilmelerin olduğu görülmektedir. Analizler neticesinde, maksimum ve minimum asal gerilmeler her iki modelde de tüm depremler için, geçiş bölgesi ve minarenin orta bölgesinde yoğunlaşmıştır. Literatürde yapılan çalışmalarda benzer sonuçlara ulaşılmıştır [4, 6, 36 ve 47].

Şekil 10'da zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda tüm deprem yüklemeleri için yapı zemin etkileşimli ve ankastr mesnetli modellere ait asal gerilme - zaman grafikleri verilmiştir. Bu grafiklerde sadece asal gerilmelerin en şiddetli olduğu zaman dilimleri ele alınmıştır. Ankastr mesnetli model yerine yapı zemin etkileşimli modele geçildiğinde Pazarcık, Hatay ve Elbistan depremleri için asal gerilmenin en büyük değeri sırasıyla 2.2, 1.5 ve 2.2 katına çıkmıştır.



a) Yapı zemin etkileşimli model b) Ankastre mesnetli model

Şekil 9. Maksimum asal gerilme diyagramı (MPa)



Şekil 10. Asal gerilme - zaman grafikleri

4. Sonuçlar

Çalışmada TBDY 2018' e uygun olarak Türkiye'nin Isparta ilinde inşa edildiği düşünülen tipik yığma bir minarenin modal analizi ile sismik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapının sonlu eleman modeli SAP2000 V23.1.0 programında yapılmıştır. Çalışmada yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli olmak üzere iki farklı model oluşturulmuştur. Çalışma neticesinde elde edilen sonuçlar kısaca aşağıda verilmiştir.

- Modal analiz sonucunda yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modellemelerde ayrı ayrı 40 adet mod elde edilmiştir. Binanın etkin kütle toplamının bina toplam kütlelerine oranı yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller için her iki yönde de (x and y) sırasıyla yaklaşık %52 ve %93 gelmiştir.
- İlk modun periyot değerleri yapı zemin etkileşimli ve ankastre mesnetli modeller için sırasıyla 2.18 ve 0.54 s bulunmuştur. Bu değerler karşılaştırıldığında yapı zemin etkileşimli modelden elde edilen periyot değeri 4.04 katına çıkmıştır.
- Sismik analizler sonucunda her iki modelde de en büyük rölatif yer değiştirme minarenin tepe noktasında meydana gelmiştir. Elbistan, Hatay ve Pazarcık depremleri için yapı zemin etkileşimli modele göre ankastre mesnetli modelden elde edilen yer değiştirme değerlerinde sırasıyla %77.46, %82.65 ve %86.57 azalma meydana gelmiştir.
- Yapı zemin etkileşimli model için en büyük rölatif yer değiştirme 17.65 cm ile Pazarcık depreminde, ankastre mesnetli model için 2.81 cm ile Hatay depreminde meydana gelmiştir.
- Tepki spektrumu analizinden elde edilen sonuçlarda yapı zemin etkileşimli modelde 11.51 cm, ankastre mesnetli modelde 2.74 cm maksimum yer değiştirme meydana gelmiştir.
- Zaman tanım alanında yapılan analizler sonucunda yapı zemin etkileşimli modelde daha yüksek asal gerilme elde edilmiştir.
- Maksimum ve minimum asal gerilmeler minarenin geçiş bölgesinde ve orta bölgesinde yoğunlaştığı için olası bir depremde bu bölgelerde hasarın meydana gelmesi beklenmektedir. Bu sebeple bu bölgelerin güçlendirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin yığma bir minarenin sismik davranışına etkisi incelenmiş ve önemli bulgular elde edilmiştir. Ancak, gelecekteki çalışmalarda bu bulguların daha geniş kapsamlı ve farklı parametrelerle test edilmesi yararlı olacaktır. Özellikle, daha fazla sayıda yığma yapının farklı

zemin tipleri ve dinamik özellikler göz önüne alınarak modellenmesi, yapı zemin etkileşiminin yapısal davranışa etkisinin daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkı sağlayacaktır. Ayrıca, doğrusal olmayan analiz yöntemleri ve farklı zemin koşulları kullanılarak daha karmaşık senaryoların araştırılması, bu tür yapıların sismik performansının daha hassas bir şekilde değerlendirilmesine olanak tanıyabilir. Son olarak, deneysel çalışmaların sayısal analizlerle birleştirilmesi, bu tür yapıların gerçek davranışını daha doğru şekilde yansıtabilir.

Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Kilis Postası. 2023. Deprem Sonrası Şih Ahmet Camii Minaresi Yıkıldı. <https://www.kilispostasi.com/deprem-sonrasi-sih-ahmet-camii-minaresi-yikildi/1222421/> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [2] Yeni Asır. 2022. İzmir'de depremde yıkılan minare havadan görüntüledi. <https://www.yeniasir.com.tr/izmir/2022/11/04/izmirde-depremde-yikilan-minare-havadan-goruntulendi> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [3] Yurdakul, M., Yılmaz, F., Artar, M., Can, Ö., Öner, E., Daloğlu, A. T. 2021. Investigation Of Time-History Response Of A Historical Masonry Minaret Under Seismic Load. Structures, 30, 265-276.
- [4] Hökelekli, E., Demir, A., Ercan, E., Nohutçu, H., Karabulut, A. 2020. Seismic Assessment in A Historical Masonry Minaret by Linear and Non-Linear Seismic Analyses. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 64(2), 438-448.
- [5] Atmaca, B., Ertürk Atmaca, E., Roudane, B., Güleş, O., Demirkaya, E., Aykanat, B., Altunişik, A. C., Günaydin, M., Arslan, M. E., Kahya, V., Tatar, T. Aslan, B., Sezdirmez, T., Sunca, F., Okur, F. Y., Adanur, S., Saribiyik, A., Aydın, F., Genç, A. F., Kirtel, O., Demir, A., Öztürk, H., Dok, G., Emiroğlu, M., Akgül, T. 2024. Field Observations and Numerical Investigations on Seismic Damage Assessment of RC and Masonry Minarets During the February 6th, 2023, Kahramanmaraş (Mw 7.7 Pazarcık and Mw 7.6 Elbistan) Earthquakes in Türkiye. International Journal of Architectural Heritage, 1-26.

- [6] Nohutcu, H. 2019. Seismic Failure Pattern Prediction in a Historical Masonry Minaret Under Different Earthquakes. *Advances in Civil Engineering*, 1-16.
- [7] Yetkin, M., Dedeoğlu, İ. Ö., & Calayır, Y. 2021. Ocak 2020 Sivrice Depremi Sonrasında Elazığ İlinde Bulunan Minarelerde Meydana Gelen Hasarların Araştırılması ve Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33 (2), 379-389.
- [8] Eronat, Ş. S. (2022). Yığma Minarelerin Dinamik Analizi (Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [9] Işık, E., Avcil, F., Harirchian, E., Arkan, E., Bilgin, H., Özmen, H. B. 2022. Architectural Characteristics and Seismic Vulnerability Assessment of a Historical Masonry Minaret under Different Seismic Risks and Probabilities of Exceedance. *Buildings*, 12(8), 1200.
- [10] Maraş, M. M., Özmen, A., Sayın, E., Ayaz, Y. 2022. Seismic Assessment of The Historical Sütlu Minaret Mosque". *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 66(2), 445-459.
- [11] Trešnjo, F., Humo, M., Casarin, F., Ademović, N. 2023. Experimental Investigations and Seismic Assessment of a Historical Stone Minaret in Mostar. *Buildings*, 13(2), 536.
- [12] Türker, T., Demirtaş, B., Ural, A., Kömür, M. A. 2022. Seismic Behavior of Historical Inclined Minarets under Near and Far Fault Ground Motions. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(11), 5866-5880.
- [13] Işık, E., Ademović, N., Harirchian, E., Avcil, F., Büyüksaraç, A., Hadzima-Nyarko, M., Bülbül, M. F., Işık, F. M., Antep, B. 2023. Determination of Natural Fundamental Period of Minarets by Using Artificial Neural Network and Assess the Impact of Different Materials on Their Seismic Vulnerability. *Applied Sciences*, 13(2), 809.
- [14] Şentürk, İ., Ergün, M., Artar, M. 2022. Seismic Behavior Assessment of Historical Alaeddin Bey Mosque and Strengthening Suggestions by CFRP Fabric and Steel Plate. *Engineering Failure Analysis*, 137, 106242.
- [15] Işık, E., Harirchian, E., Arkan, E., Avcil, F., Günay, M. 2022. Structural Analysis of Five Historical Minarets in Bitlis (Turkey). *Buildings*, 12(2), 159.
- [16] Genç A. F., Altunışık, A. C., Günaydın, M., Okur, F. Y. 2022. Finite Element Model Updating of İskenderpaşa Mosque and Minaret Based on Experimental Measurements. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 5(4), 264-276.
- [17] Alemi, B., Kamali Zarchi, S., Assadi Chimeh, N. 2022. The Earliest Architectural Remains of the Islamic Era in Kashan: Form, Structure, and Construction Technique of the Minaret of the Jameâ Mosque. *Journal of Iranian Architecture Studies*, 8(15), 5-25.
- [18] Adam, M. A., El-Salakawy, T. S., Salama, M. A., Mohamed, A. A. 2020. Assessment of Structural Condition of a Historic Masonry Minaret in Egypt. *Case Studies in Construction Materials*, 13, e00409.
- [19] Hoseynzadeh, H., Mortezaei, A. 2021. Seismic Vulnerability and Rehabilitation of One of The World's Oldest Masonry Minaret under The Different Earthquake Frequency Contents. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 9(4), 12-36.
- [20] Kılıç, İ., Bozdoğan, K. B., Aydın, S., Gök, S. G., vd. (2020). Kule Tipi Yapıların Dinamik Davranışının Belirlenmesi: Kırklareli Hızırbey Camii Minaresi. *Politeknik Dergisi*, 23(1), 19-26.
- [21] Casolo, S., Uva, G. 2013. Non-linear dynamic analysis of masonry towers under natural accelerograms accounting for soil-structure interaction. *ECCOMAS Thematic Conference-COMPDYN 2013: 4th International Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, Proceedings- An IACM Special Interest Conference*, 12-14 June, Greece, 4488-4506.
- [22] Sanal Şantiye. 2017. Yapı zemin etkileşimi. <https://www.sanalsantiye.com/yapi-zemin-etkileşimi/> (Erişim Tarihi: 01.04.2023).
- [23] Korkmaz, K. A., Demir, F. 2012. Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapıların Deprem Davranışına Etkileri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 12-17.
- [24] Girgin, S. C., Mısır, S., Özden, G., Kahraman, S. 2008. Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 10(1), 27-37.

- [25] Baş, S. 2019. Estimation of Seismic Response of R/C Frame Structures to Vertical Earthquake Motion Considering Fixed Support and Soil-Structure-Interaction (SSI). *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 7-17.
- [26] Lazizi, A. H., Tahghighi, H. 2023. Influence of Soil-Structure Interaction on Seismic Demands of Historic Masonry Structure of Kashan Grand Bazaar. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(1), 151-176.
- [27] Hökelekli, E., Al-Helwani, A. 2020. Effect of Soil Properties on the Seismic Damage Assessment of Historical Masonry Minaret-Soil Interaction Systems. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, 29(2), e1694.
- [28] Fathi, A., Sadeghi, A., Emami Azadi, M. R., Hoveidae, N. 2020. Assessing the Soil-Structure Interaction Effects by Direct Method on the out-of-plane Behavior of Masonry Structures (Case Study: Arge-Tabriz). *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 6429-6443.
- [29] Karki, P., Pyakurel, S., Utkarsh, K. 2023. Seismic Performance Evaluation of Masonry Infill RC Frame Considering Soil-Structure Interaction. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 5.
- [30] Yıldız, Ö., Doğan, E. 2022. Soil-Structure Interaction Analysis of Çelebiağa Mosque, Pertek-Türkiye. *Journal of Construction*, 21(3), 749-766.
- [31] Cacciola, P., Caliò, I., Fiorini, N., Occhipinti, G., Spina, D., & Tombari, A. (2022). Seismic response of nonlinear soil-structure interaction systems through the Preisach formalism: the Messina Bell Tower case study. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-30.
- [32] Shabani, A., Feyzabadi, M., & Kioumars, M. (2022). Model updating of a masonry tower based on operational modal analysis: The role of soil-structure interaction. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00957.
- [33] SAP2000 V23.1.0 Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual.
- [34] Işık, E., Antep, B. 2018. Ahlat İlçesinde Yer Alan Tarihi Yığma Minarenin Yapısal Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 46-56.
- [35] Mutman, U. 2001. Seçilen bir arazide dinamik kompaksiyon uygulaması ve SAP90 programı ile modellenmesi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans tezi, 180s, Kocaeli.
- [36] Hökelekli, E. 2020. Yapı-Zemin Etkileşiminin Tarihi Yığma Minarelerin Deprem Davranışına Etkisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 11(2), 825-838.
- [37] TBDY 2018, Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı-Deprem Dairesi Başkanlığı, Ankara.
- [38] AFAD. 2023. Turkey Earthquake Hazard Maps Interactive Web Application. <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> (Erişim Tarihi: 02.03.2023).
- [39] Erkek, H., & Yetkin, M. (2023, December). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620, Elsevier.
- [40] Nasery, M. M. (2023). Post-earthquake damage assessment of inaccessible areas in the Harran grand mosque (Ulu Mosque) minaret using digital twin modelling. *Proceedings of 3rd International Civil Engineering and Architecture Congress (ICEARC'23)*
- [41] Ersoy, S. (2023). Evaluation of the cultural heritage buildings in an ancient district of Antakya after the Kahramanmaraş earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6).
- [42] Onat, O., Deniz, F., Özmen, A., Özdemir, E., & Sayın, E. (2023, December). Performance Evaluation and Damage Assessment of Historical Yusuf Ziya Pasha Mosque After February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes. *Structures* (Vol. 58, p. 105415). Elsevier.
- [43] Nasery, M. M. (2023). Investigating of the Reasons for the Collapse on the Entrance Arches of the Harran Grand Mosque (Ulu Cami) During the Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Civil Engineering Beyond Limits*
- [44] Demir, A., Celebi, E., Ozturk, H., Ozcan, Z., Ozocak, A., Bol, E., Sert, S., Sahin, F., Z., Arslan, E., Yaman, Z., D., Utkucu, M., & Mert, N. (2024). Destructive impact of successive high magnitude earthquakes occurred in Türkiye's Kahramanmaraş on February 6, 2023. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-27.

- [45] AFAD. 2023. Earthquake. <https://tadas.afad.gov.tr/> (Erişim Tarihi: 02.03.2023).
- [46] Seismomatch. 2019. Seismosoft Earthquake Engineering Software Solutions, Eshop Designed & Developed by Pontemedia.
- [47] Altıok, T., Demir, A. 2021. Collapse Mechanism Estimation of a Historical Masonry Minaret Considered Soil-Structure Interaction. *Earthquakes and Structures*, 21(2), 161-72.